

福井大学平成22年度重点研究「競争的配分経費（若手研究者支援）」

# ボース凝縮原子気体による原子波回路の構築

研究代表者： 熊倉 光孝（工学研究科・准教授）

概 要	希薄原子気体のボース凝縮体は、原子集団全体がコヒーレントな一つの原子波として振舞う。この原子波の伝搬においては、単一原子の場合とは異なって非線形性を持つため、従来にな ない新奇な量子現象が現れるものと期待される。我々はそれらを実験的に探求し、新たな量子デバイスや 精密計測に応用するため、原子波の回路を実現することを目指している。これまでに Rb 原子の葉巻型 ボース凝縮体を準備し、今後、レーザー光を利用してこれをリング状に断熱変形することを計画してい るが、本年度はこの変形に必要なレーザービームの高速空間掃引システムの開発を進めた。また、誘導 ラマン遷移を利用して原子波位相の光学的な操作を行うため、低膨張ガラス製高Q共振器を用いたレー ザー周波数安定化システムの製作も試みた。
関連キーワード	レーザー冷却、原子光学、Bose-Einstein 凝縮、物質波、レーザー周波数安定化

## 研究の背景および目的

Bose 統計性を持つ粒子の集団を極低温にまで冷却すると、巨視的な個数の粒子が量子力学的な最低運動エネルギー状態に落ち込み、集団全体が単一のコヒーレントな波動として振舞う。この Bose-Einstein 凝縮と呼ばれる現象は、液体ヘリウムや極低温金属などで実現され、超流動や超伝導という興味深い現象を引き起こすことが知られており、長い間その量子力学的な性質が大きな注目を集めてきた。しかし、これらの研究では、対象となる物質が液体や固体であったため、構成粒子間の相互作用が強く理論的な解釈が難しいことや、実験的な観測手段が限られていることなどの難点があった。

一方、レーザー冷却法によって生成される希薄原子気体の Bose 凝縮体は、原子密度が低いために理論的な取り扱いが容易で、ほぼ理想的な Bose 凝縮体として扱うことができる。また、レーザーを利用した様々な光学的手法により、原子の運動状態や内部状態を直接操作・観測することも可能で、これまで研究が進んでいなかった Bose 凝縮体の基礎物理の研究や、原子の波動性を利用した新技術への応用が大いに期待されている。

我々の中でも、この新たな Bose 凝縮体における原子波の非線形伝搬現象とその応用に特に注目して、現在の研究を進めている。Bose 凝縮体中の原子波伝搬には原子間衝突によって非線形性が強く現われ、よく知られている線形なシュレーディンガー方程式に従う単一原子の波動関数とは、その振る舞いが大きく異なる。そのため、外場やレーザーなどを用いて原子波の位相やポテンシャルを多彩に制御することにより、これまでに知られていなかった非線形性に起因する特異な量子現象を実験的に調べるができる。また、それらの新

現象を探求することで、従来にない新しい原理に基づく量子デバイスや原子波を利用した新技術への応用も期待される。

そこで、このような実験研究を行うために、我々は原子波伝搬の長時間観察や正確な制御に適した場として、リング状の Bose 凝縮体（原子波回路）を実現することを目指している。従来の実験では Bose 凝縮に有利な3次元調和型ポテンシャルにトラップした葉巻型の Bose 凝縮体が主に用いられてきたが、このような凝縮体では端での反射や擾乱などにより長時間に亘る原子波の観測や制御は困難であった。これを端のないリング状にすることで、円周方向の原子波伝搬を擾乱が少ない状態で詳細に観測・制御できると期待される。

現在進めている原子波回路の構築方法は、通常の葉巻型 Bose 凝縮体を始めに準備し、これにレーザー光による光ポテンシャルを印加して断熱的にリング状に変形するというものである。これまでに我々は磁気トラップ装置を利用して <sup>87</sup>Rb 原子気体（基底状態 <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub>, F=2, m=2）の Bose-Einstein 凝縮に成功しており（原子数～10<sup>5</sup> 個、長さ～100 μm、直径～10 μm の葉巻型）、本研究ではこれを変形するために必要なレーザービームの高速空間掃引システムの開発を進めた。

また、Bose 凝縮体の原子波位相制御についても、凝縮体をトラップに保持し続けることが可能な、同一電子状態間の誘導ラマン遷移を利用した光学的位相印加法を実現するため、反跳エネルギーに相当する 10 kHz 程度以下の周波数線幅を持つ狭帯域レーザー光源（波長 780 nm）の開発を進めた。今回、新たに超低膨張ガラス製の高Q共振器を導入し、kHz 程度の精度で周波数安定化を行うレーザー光学システムの構築を目指した。

## 研究の内容および成果

葉巻型の Bose 凝縮体をリング状に変形することは、正のポテンシャルを原子に印加して凝縮体中心部に穴を開けるようなレーザー光と、負のポテンシャルを印加して平面内に閉じ込めを行うようなレーザー光の、二種類のレーザービームを空間精度よく凝縮体に照射することによって可能である。前者は原子の共鳴（波長 780nm）から大きく正に離調した波長 532 nm のレーザー光を利用することで、また、後者は負に大きく離調した 1064 nm のレーザー光を利用することで準備することができるが、凝縮体を正確なリング状に断熱変形するためには、光強度を連続的に変化させながら照射位置を  $\mu\text{m}$  の精度で制御できる光学システムが必要である。そこで今回、回折方向を互いに直交させた 2 個の音響光学変調器によるビーム照射位置制御システムを新たに製作した（図 1）。10  $\mu\text{s}$  程度の切り替え時間で周波数と強度を変化させたラジオ波（ $\sim 80\text{ MHz}$ ）を、それぞれの変調器に同期して印加するシステムで、これにより高速にビーム照射位置を空間掃引できることを確認した。しかし、未だ RF 強度の変化時において変調器の結晶温度変化によるビーム位置の変動が大きく、現在、放熱や照射位置変動の補償などの対策を進めている。

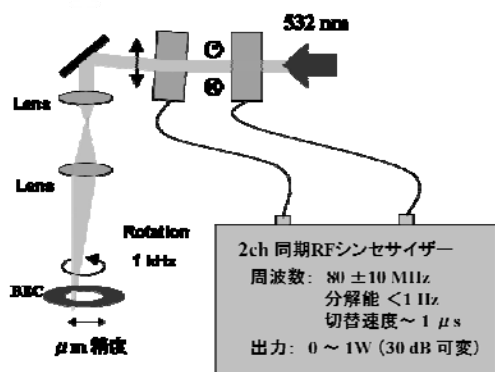


図 1. レーザービームの高速空間掃引システム

同一電子状態間の誘導ラマン遷移によって原子波に位相印加を行うには、Rb 原子の反跳エネルギーに相当する 10 kHz 程度以下の周波数線幅を持つ狭帯域レーザー光が必要である。そこで、外部共振器による光帰還を利用した半導体レーザー（波長 780 nm）の周波数安定化システムと、この狭窄化されたレーザー線幅の高分解測定装置の開発を行った（図 2）。半導体レーザーからの出力光は、始めに回折格子に導かれ、1 次回折光のフィードバックによって 1 MHz 程度の線幅に狭窄化される。次に、この回折格子からの出力光の一部が共振器に導かれ、共鳴時の反射光をフィードバックすることにより、出力光周波数を共鳴周波数に安定化する。この光源部分は全体として共振器を構成するため、光源全体は  $\pm 10\text{ mK}$  以下に温度安定するとともに、防振ゴムによって防振されている。得られた出力光のスペクトルを、超低膨張ガラス製光共振器を用いて新たに構築した kHz 程度のスペクトル分解能が期待される計測システムで測定したところ、40 kHz 程度であることが確認された。未だ必要な線幅には至っていないが、現在、この共振器の共鳴信号を利用して更なる周波数安定化を試みている。

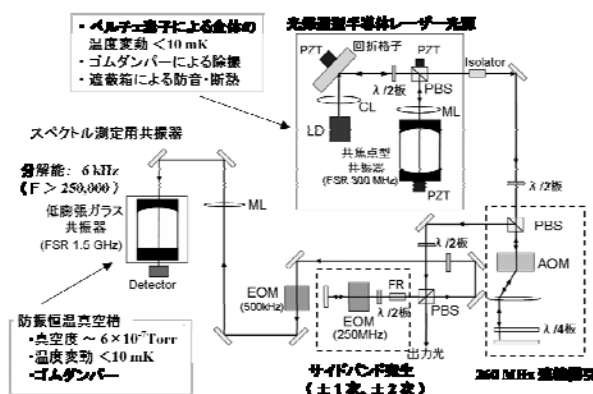


図 2. 周波数安定化レーザー光源

## 本助成による主な発表論文等、特記事項および競争的資金・研究助成への申請・獲得状況

### 「主な発表論文等」

- ・熊倉 光孝, “原子波回路を用いた物質波ソリトンの光学的制御”, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-BX-11 (厚木, 2011).

### 「特記事項」

この課題に関連して以下の特許を出願中です。

- ・熊倉 光孝, 森田 紀夫, “物質波ソリトンを用

いた精密計測装置”, 2009-259334

### 「競争的資金・研究助成への申請・獲得状況」

本研究は平成 22 年度科学研究費補助金 基盤研究 (B) (課題番号: 22340117) の支援を受けて実施されました。ここに厚くお礼申し上げます。なお、本研究課題は引き続き平成 23~25 年度にわたり継続の予定です。